Manito: Potenciando el aprendizaje inicial con IA y robótica colaborativa

RESPUESTA A OBSERVACIONES

RESPUESTA OBSERVACIONES INF. DE AVANCE 1

Indicación 1: modificaciones estructurales del prototipo

Fecha 28 de octubre de 2026
Autores Cristhian Alejandro Aguilera Carrasco
Institución Universidad San Sebastián
Entidad asociada Servicio Local de Educación Pública Llanquihue

Índice

1 Antecedentes 2
2 Modelo actual 2
3 Respuesta al plan de mejoras 3
3.1 Integridad estructural 3
3.2 Transmisión 4
3.3 Simplificación del diseño y ensamblaje 5
3.4 Espacio de trabajo 6
4 Resultados comparativos 6
5 Avance hacia TRL 6 7
6 Anexos 8

1 Antecedentes

Mediante el Acta de Evaluación del Informe de Avance Anual N° 1, firmada el 30 de octubre de 2025, ANID aprobó el informe del proyecto IT24I0091 con la siguiente indicación:

> Entregar un informe donde se plasme los registros de las modificaciones estructurales y de materiales mediante informes de prueba, planos actualizados y resultados comparativos que respalden la trazabilidad del desarrollo hacia TRL 6.

La versión preliminar del robot cumplió la meta de precisión del Hito 1: en 100 pruebas de posicionamiento alcanzó un error promedio de 4,22 mm, inferior al límite de 10 mm. Aun así, el Informe de Avance 1 identificó deficiencias estructurales que afectaban la robustez, la durabilidad y el ensamblaje del robot, y las abordó con un plan de mejoras en cuatro líneas (Anexo C del informe). Este documento responde a ese plan: para cada línea describe el problema identificado, lo comprometido y su implementación en el modelo actual.

2 Modelo actual

El modelo actual mantiene la arquitectura SCARA de la versión preliminar (Figura 1): rotación de la base, eje vertical Z y dos eslabones en el plano, más el accionamiento de la pinza. La versión actual incorpora cambios estéticos y funcionales en todas sus partes, orientados a resolver las deficiencias detectadas en el primer diseño.

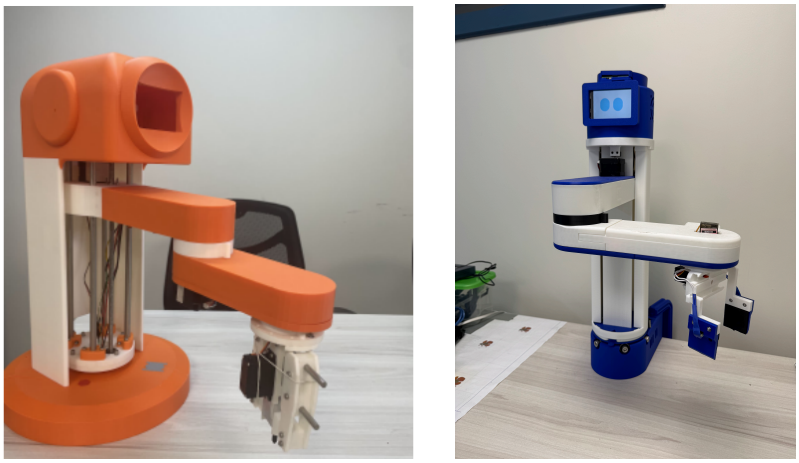
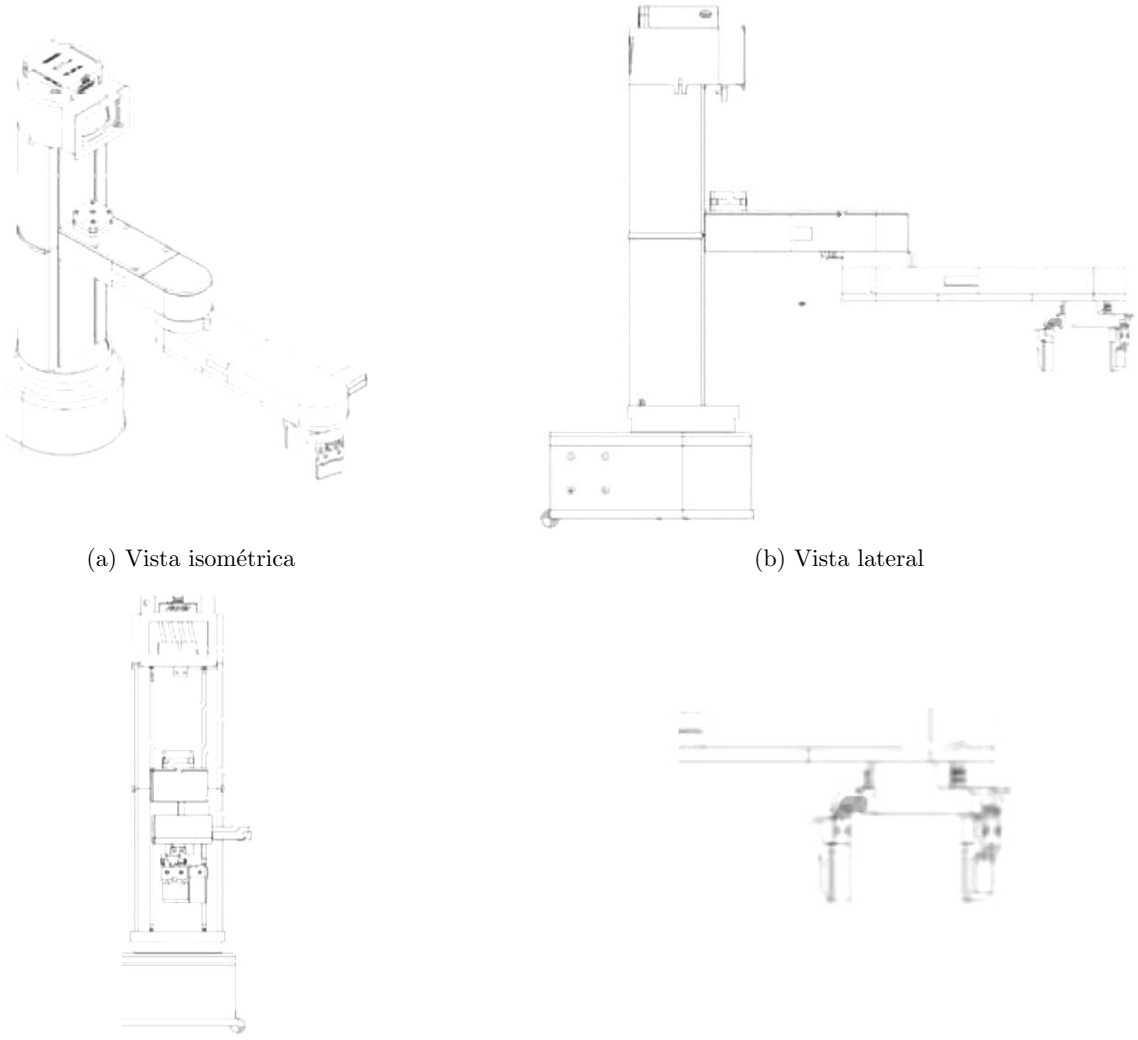


Figura 1: Versión preliminar (izquierda) y modelo actual (derecha).

La Figura 2 muestra las vistas CAD del modelo actual. Los planos de cada pieza se incluyen en el anexo «Manual de construcción».



(a) Vista isométrica

(b) Vista lateral

(c) Torre del eje Z

(d) Pinza

Figura 2: Vistas CAD del modelo actual.

3 Respuesta al plan de mejoras

3.1 Integridad estructural

Problema. La versión preliminar carecía de rigidez: el brazo se inclinaba al extenderse por el momento flector del peso de la torre del eje Z y los brazos; las múltiples uniones atornilladas acumulaban holguras que se traducían en juego en el efector final, y esas uniones perdían apriete con el uso.

Plan. Incrementar significativamente la rigidez y estabilidad estructural del robot en todo su rango de movimiento.

Tabla 1: Plan e implementación.

Línea de acción	**Implementación en el modelo actual**
Base y sistema de rotación que soporten el momento flector del brazo.	Se reemplazó el sistema de poleas de la base por un conjunto de engranajes conectado directamente al motor paso a paso existente. Además, se rediseñó la unión entre la torre y la base para aumentar el área de contacto, reducir la holgura entre ambos componentes y mejorar la estabilidad del robot.
Reducir la acumulación de tolerancias y el juego en el efector final.	Junto con el nuevo sistema de rotación de la base, se modificó la torre del eje Z: las cuatro barras guía metálicas se sustituyeron por tres, distribuidas en una configuración triangular, y se mantuvo el husillo que acciona el movimiento vertical. Este cambio aumenta la rigidez del conjunto y reduce el juego mecánico.
Asegurar el apriete constante de las uniones estructurales bajo operación continua.	Se rediseñaron las uniones estructurales y se incorporaron encajes a presión (snap-fit) y guías con pasadores para facilitar el acoplamiento de las piezas y reducir la dependencia de uniones atornilladas.

Resultado. El rediseño aumentó la rigidez del robot y redujo la inclinación del brazo en el eje Z, causada por la holgura en la unión entre la torre y la base, de aproximadamente 5° a menos de 1°. El error de posicionamiento promedio bajó de 4,22 mm a 0,6 mm (Tabla 5). El anexo «Manual de construcción» describe con mayor detalle las modificaciones de las piezas y sus uniones.

3.2 Transmisión

Problema. El ajuste de la tensión de las correas era crítico: una tensión excesiva provocaba pérdida de pasos en los motores y una insuficiente generaba backlash. Además, los componentes impresos en 3D sometidos a fricción se desgastaban de forma acelerada.

Plan. Desarrollar un sistema de transmisión por poleas que sea fiable, preciso y duradero.

Tabla 2: Plan e implementación.

Línea de acción	**Implementación en el modelo actual**
Ajuste de la tensión de las correas preciso, medible y sostenible.	Como se indicó en la sección anterior, la transmisión por poleas de la base se sustituyó por un tren de engranajes. En el brazo se mantuvo la transmisión por correas, ya que los engranajes impresos evaluados aumentaban el juego mecánico debido a las variaciones de temperatura durante el uso y a la deformación del material. Además, se rediseñaron las piezas del brazo para facilitar el acceso a las correas. Así, la tensión puede ajustarse de forma simple y revisarse periódicamente como parte del mantenimiento, lo que permite conservarla en el tiempo.
Mejorar la vida útil de los componentes sometidos a fricción.	Se evaluaron ABS y ASA como alternativas, pero se descartaron porque emiten vapores durante la impresión y requieren ventilación adecuada y, en general, impresoras cerradas, condiciones difíciles de asegurar en los establecimientos educacionales. Por ello, se mantuvo el PLA como material principal. Para abordar el desgaste y la deformación durante el uso, se priorizó un diseño que facilite la reparación y el reemplazo de los componentes, mediante encajes a presión y piezas de fácil acceso.
Piezas fácilmente reemplazables.	El diseño facilita el montaje y desmontaje de los componentes, lo que simplifica su reemplazo y reduce la complejidad y el costo de las reparaciones.

Resultado. La mayor modularidad del diseño facilita el ensamblaje, el mantenimiento y la sustitución de los componentes sujetos a desgaste.

3.3 Simplificación del diseño y ensamblaje

Problema. El diseño estaba fragmentado en 220 piezas, lo que extendía y complicaba el montaje y contribuía a la acumulación de tolerancias.

Plan. Racionalizar la arquitectura del robot para reducir su complejidad y mejorar su precisión intrínseca.

Tabla 3: Plan e implementación.

Línea de acción	**Implementación en el modelo actual**
Disminuir el número de componentes integrando funciones en piezas únicas.	Se redujo el número total de piezas de 220 a 103, de las cuales 37 son piezas únicas, y se redujo la variedad de componentes utilizados. En particular, se priorizó el uso de tornillos del mismo tipo para simplificar el ensamblaje y las reparaciones.
Ensamblaje rápido, intuitivo y con un mínimo de ajustes posteriores.	Se revisaron las instrucciones de ensamblaje para facilitar el armado del robot. Las piezas se diseñaron para su fabricación en impresoras 3D con un volumen de impresión de $20 \times 20 \times 20$ cm.

Resultado. El rediseño reduce la cantidad y variedad de piezas y facilita el ensamblaje, con el apoyo de un manual de construcción actualizado.

3.4 Espacio de trabajo

Problema. La base obstruía el movimiento del brazo y generaba una zona muerta alrededor del eje de rotación principal.

Plan. Ampliar el área de trabajo útil y accesible para el efector final.

Tabla 4: Plan 5.4 e implementación.

Línea de acción	**Implementación en el modelo actual**
Modificar la geometría de la base para minimizar las zonas no alcanzables.	Se modificó la geometría de la base para mejorar su fijación a la mesa y facilitar el alcance de las piezas dentro del espacio de trabajo. Además, se integró la fuente de alimentación en la base.
Alargar las articulaciones para cubrir un área mayor.	Se amplió el alcance de los brazos hasta 41 cm. La experiencia realizada con estudiantes en un colegio de Nueva Braunau mostró que las mesas de las salas ofrecen un espacio limitado, lo que dio origen a un nuevo requerimiento: operar en un área de trabajo de 20 × 30 cm. En consecuencia, la longitud de los brazos se ajustará a esa área, que también se incorpora como restricción en el diseño de las actividades didácticas.

Resultado. Se rediseñó la base y se amplió el alcance del robot hasta 41 cm. A partir de la experiencia en aula, se incorporó como nuevo requerimiento un área de trabajo de 20 × 30 cm, compatible con las mesas de los establecimientos educacionales, y se está ajustando la longitud de los brazos a esa área.

4 Resultados comparativos

Para comparar ambas versiones se repitieron en el modelo actual las mediciones del Informe de Avance 1 (Tabla 5).

Precisión. El error de posicionamiento promedio fue de 0,6 mm y el máximo, de 1 mm. Como la regla utilizada tiene una resolución de 1 mm, el resultado se interpreta como un error de posicionamiento igual o inferior a 1 mm.

Inclinación del brazo. La inclinación del brazo en el eje Z, causada por la holgura en la unión entre la torre y la base, se midió con un transportador.

Tabla 5: Comparación de precisión, holgura torre-base y número de piezas.

Indicador	**Versión preliminar**	**Modelo actual**	**Comentarios e interpretación**
Error de posicionamiento promedio (meta ≤ 10 mm)	4,22 mm	0,6 mm	El error máximo del modelo actual fue de 1 mm, igual a la resolución de la regla, por lo que el resultado se interpreta como un error igual o inferior a 1 mm.
Inclinación del brazo en Z (holgura torre-base)	Aprox. 5°	Menos de 1°	Corresponde al descuelgue del brazo identificado en el informe anterior. La menor holgura limita el movimiento relativo entre la torre y la base y favorece la estabilidad frente a oscilaciones y vibraciones.
Número de piezas	220	103	El conteo de la versión preliminar no se desglosó por tipo de pieza; el del modelo actual cuenta con ese detalle e incluye tornillos y otros elementos de fijación. De ellas, 37 son piezas únicas: 30 en el cuerpo del robot y 7 en la garra. La reducción de 220 a 103 piezas (53 %) simplifica el ensamblaje y disminuye las uniones que acumulan tolerancias.

La reducción del error es coherente con el diagnóstico del informe anterior, que atribuía el error de posicionamiento a la inclinación del brazo, cuyo efecto aumenta con la distancia al eje de rotación, y a la acumulación de holguras en las uniones. El rediseño redujo ambas fuentes: la inclinación bajó de aproximadamente 5° a menos de 1° y el número de piezas, de 220 a 103. En el modelo actual, el error queda en el límite de resolución de la regla; para cuantificar desviaciones menores a 1 mm se requeriría un instrumento de mayor resolución.

5 Avance hacia TRL 6

Con las modificaciones descritas, el modelo actual cumple la meta de precisión (error igual o inferior a 10 mm) y la restricción de fabricación en impresoras 3D de 20 × 20 × 20 cm establecidas en la lista de requerimientos del robot. Este modelo ya está construido y será la base de la versión que se utilizará en los establecimientos educacionales, la que incorporará los ajustes previstos durante la prórroga del proyecto.

A raíz de la Ley N° 21.801, que regula el uso de dispositivos tecnológicos en establecimientos educacionales, el proyecto obtuvo una prórroga de ocho meses que incorporó al OE1 una fase adicional de desarrollo del brazo robótico y amplió la etapa PT 4.3 a «Mejoras y ajustes de software y hardware». Durante esta etapa se completará la reducción de la longitud de los brazos para operar en el área de trabajo de 20 × 30 cm y, de ser necesario, se adaptarán los mecanismos de interacción del robot a la normativa. Estos ajustes se documentarán oportunamente.

Las actividades didácticas que se realizarán con el robot ya están contempladas. Una vez incorporados los ajustes, solo resta el periodo de pruebas en los establecimientos educacionales para alcanzar el TRL 6 comprometido. Asimismo, se encuentra en curso el proceso de protección de la propiedad intelectual del modelo.

6 Anexos

1. Manual de construcción del modelo actual, con los planos de cada pieza y la lista de materiales.